

возможности на сегодняшний день не исчерпаны. Рассмотренные в данной статье методы по своим результатам не уступают применению катализатора, имея значительный выигрыш в стоимостном отношении.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корчагин В.А., Филоненко Ю.Я. Экологические аспекты автомобильного транспорта. -М.: МНЭПУ, 1997.
2. Изменение состояния окружающей природной среды в Российской Федерации за последние 10 лет. Доклад Первого заместителя Руководителя Росгидромета Ц а т у р о в а Ю.С. <http://www.ecocom.ru/2thCongress/3-7.htm>
3. Гоц А.Н., Драгомиров С.Г., Куделя И.Н. Тезисы VII Международного научно-практического семинара. Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС. Владимирский государственный университет (ВлГУ) <http://www.vpti.vladimir.ru/rus/public/conf/1.htm>.
4. Матвеев С.Г., Орлов М.Ю., Чечет И.В. Методы снижения выбросов канцерогенного углеводорода бенз(а)пирена автомобильными ДВС.// Вестн. СГАУ. Сер.: Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей. Вып. 2; Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 1999. – С.125-130.
5. А.В о р о б ь е в – О б у х о в. Вечное движение.//За рулем, 1999, -№12
6. Двигатели внутреннего сгорания Том 2. /Под ред. Л у к а н и н а В.Н.. -М.: Высшая школа, 1995.

УДК 621.438:536.58

### **АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ДОВОДКА КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭКОЛОГИЧНОСТИ**

Мингазов Б.Г., Королев А.Н., Меркушин В.К., Явкин В.Б.

*Казанский государственный технический университет,  
ОАО КПП "Авиамотор", г. Казань*

Одним из основных требований при доводке камер сгорания является обеспечение высокой надежности ее работы и снижения выброса  $NO_x$ . Очевидно, для этого необходимо обеспечить такой процесс выгорания топлива, при котором распределение температуры газов по длине жаровой трубы должно иметь минимальные значения местных температур

газа или же область высоких температур малой протяженности. Требуемое распределение температур можно получить путем соответствующего распределения площадей отверстий подвода вторичного воздуха в жаровую трубу.

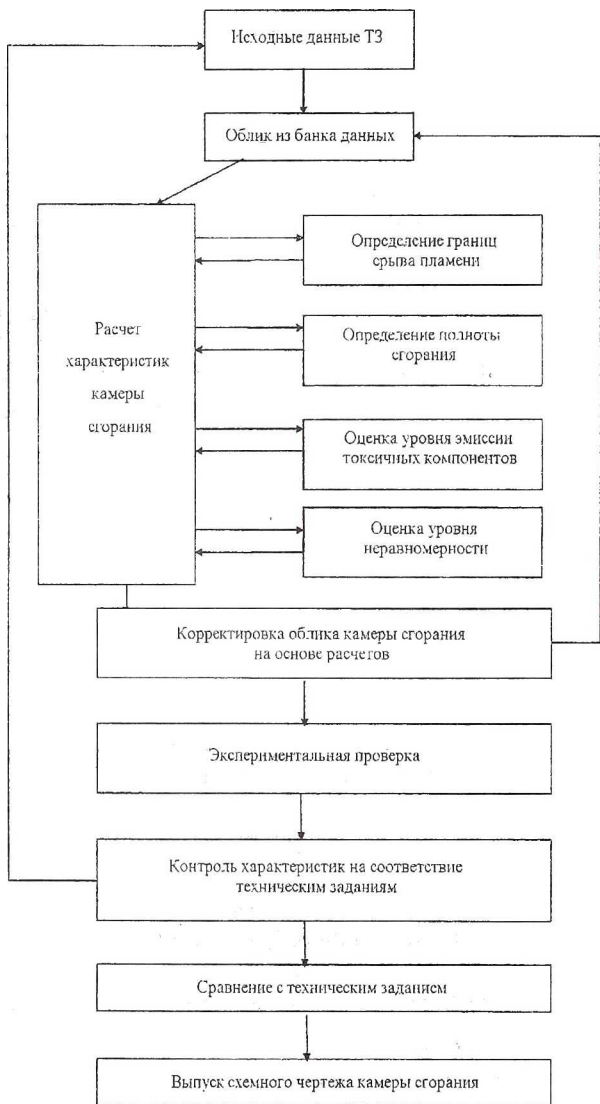


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной доводки КС ГТД

В случае экспериментальной доводки эта работа потребовала бы больших затрат, как материальных, так и временных. Применение автоматизированной доводки может значительно уменьшить объем этих работ.

Существующие модели внутрикамерных процессов позволяют автоматизировать отдельные этапы доводочных работ камеры сгорания [1, 2].

Рассмотрим алгоритм проведения доводочных работ с помощью системы автоматизированного проектирования, представленной на рис. 1.

Исходные облик и распределение воздуха представлены на рис.2.



Рис. 2. Облик камеры сгорания и распределение воздуха по длине жаровой трубы

Характерными геометрическими параметрами этой камеры являются следующие:

- относительная площадь фронтного устройства,  
 $F_{\text{фр}} = 0,106;$

- высота и площадь миделевого сечения жаровой трубы,  $H_{\text{ж}} = 0,150 \text{ м}$ ,  $F_{\text{ж}} = 0,377 \text{ м}^2$  соответственно;
- относительное распределение вторичного воздуха по длине жаровой трубы;
- размеры, количество, форма и расположение отверстий подвода вторичного воздуха определяются из рабочего чертежа.

Режимные параметры:

- температура воздуха на входе в КС,  $T_{\text{к}}^* = 610 \text{ К}$ ;
- давление воздуха на входе в КС,  $P_{\text{к}}^* = 0,1 \text{ МПа}$ ;
- суммарный коэффициент избытка воздуха в КС  $\alpha_{\text{к}} = 5,6$ ;
- расход воздуха через КС  $G_{\text{к}} = 90 \text{ кг/с}$ .

Топливо – природный газ.

В ходе автоматизированной доводки требовалось получить оптимальное распределение воздуха по длине жаровой трубы, обеспечивающее высокую полноту сгорания, надежность работы камеры сгорания при минимальных выбросах токсичных компонент.

1. На начальном этапе расчетов формировался облик камеры сгорания, который может быть сформирован либо на основе среднестатистических данных и гидравлического расчета, либо на основе прототипа, в данном случае камеры сгорания НК-16СТ, включающего:

- конфигурацию наружной и внутренней оболочки жаровой трубы;
- раскрытие фронтального устройства;
- распределение относительных площадей.

2. Исходя из геометрии жаровой трубы и уравнений баланса воздуха, топлива и продуктов сгорания, приведенных ранее, определяются местные составы смеси:

$$\alpha_i = G_{Bi} / (G_{Ti} L_0).$$

3. Располагая исходными значениями температуры и воздуха на входе в расчетном сечении жаровой трубы можно определить среднюю температуру газов в этом сечении:

$$T_{\text{Гг}} = \frac{C_{\text{гг}} T_{\text{ггг}} - I G_{\text{Гг}} - I + C_{\text{вв}} T_{\text{вв}} \Delta G_{\text{вв}} + \eta_i G_{\text{Гг}} H_{\text{н}} - L_{\text{н}} G_{\text{Гг}} \Delta z}{C_{\text{гг}} G_{\text{Гг}}},$$

где  $C_{\text{гг}}$ ,  $C_{\text{вв}}$  – теплоемкость газа и воздуха в соответствующих сечениях;  $T_{\text{гг}}$ ,  $T_{\text{вв}}$  – температура газа и воздуха;  $L_{\text{н}}$  – теплота парообразования;  $G_{\text{гг}}$  – расход жидкого топлива;  $G_{\text{гг}}$ ,  $G_{\text{вв}}$  – расходы газов и воздуха;  $H_{\text{н}}$  – теплотворная способность топлива.

#### 4. Определение нормальной скорости горения

$$U_{\text{н}} = U_{\text{н0}} \left( \frac{T_{\text{Гг}}}{500} \right)^{1.8} \left( \frac{P_{\text{г}}}{10^5} \right)^{0.5} (1 - \bar{G}_{\text{пс}})^3,$$

где  $U_{\text{н0}}$  – нормальная скорость горения, определенная по многочисленным экспериментальным данным и обобщенная в виде зависимости  $U_{\text{н0}} = f(\alpha)$ , или же рассчитанная по формуле Я.Б. Зельдовича.

5. Определение интенсивности и масштаба турбулентности в потоке:

$$\varepsilon = 0,041 \left( 1 + \beta^2 \operatorname{tg}^2 \varphi \right)^{0.5} \left( \frac{X}{r_{\text{н}}} \right)^{-0.5}, \quad l = 0,14 \cdot R_k \cdot \left( \frac{X}{r_{\text{н}}} \right)^{0.5},$$

где  $\varphi$  – угол закрутки потока;  $x$  – расстояние от фронта;  $X = x + \Delta x$  – удаление от полюса закрученной струи;  $r_{\text{н}}$  – наружный радиус втулки завихрителя;  $\Delta x$  – расстояние от полюса до фронта;  $R_k$  – радиус (высота) жаровой трубы.

6. При определении местных значений составов смеси необходимо знать истинное количество вторичного воздуха, поступившего в зону горения. Для этого необходимо найти долю воздуха, смешавшегося с газовым потоком, с помощью коэффициентов смешения:

$$G_{\text{Гг}} = G_{\text{Гг}} - I (1 + \Delta m_{\text{ни}} + \Delta m_{\text{аг}}).$$

$$\text{Здесь } \Delta m_{\text{ни}} = A \frac{T_{\text{Гг}}}{T_0} \frac{w_0}{w_{\text{Гг}}} \frac{I}{k} \frac{\exp \left( 1 + \frac{r^2}{R_{\text{зот}}^2} \right)}{I_0 \left( 2k \frac{r}{R_{\text{зот}}} \right)} \frac{\Delta F_{\text{г}}}{F_{\Sigma}}, \quad k = \frac{R_{\text{зот}}}{B \left( 1 + \operatorname{tg}^2 \varphi \right)^{0.5} (x + \Delta x)};$$

$I_0$  – функция Бесселя нулевого порядка;  $A$  и  $B$  – постоянные коэффициенты, определяемые из экспериментальных данных, полученных при

испытаниях прототипа;  $\Delta F_i$  - площадь отверстий жаровой трубы на участке  $\Delta x$ ;  $F_\Sigma$  - площадь всех отверстий,  $r$  - текущий радиус;  $R_{som}$  - радиус зоны обратных токов;  $W_0$ ,  $W_z$  - скорости струи и потока.

$$\Delta m_{ni} = \frac{\Delta h_i(x) d_0 n_0 \cos \varphi}{R_{30T}^2},$$

$\Delta h_i$  - глубина проникновения поперечной струи в поток на участке  $\Delta x$ ;

#### 7. Определение полноты сгорания.

На основе рассмотрения поверхностной теории турбулентного сгорания осредненного "моля" смеси получена зависимость для определения локальной полноты сгорания топлива на рассматриваемом участке:

$$\eta = \frac{3U_{m0}^3}{W'^3} \left[ \ln \left( I + \frac{W'}{U_n} \right) \right]^3 \times \left\{ \frac{I}{3} [I - \exp(-5\Delta x \cdot k)] - \frac{U_n}{U_{m0}} [I - \exp(-3,5\Delta x \cdot k)] \right\},$$

где  $k = 5\Delta x \cdot \varepsilon / \left[ l_t \ln \left( I + \frac{W'}{U_n} \right) \right]$ ;  $l_t$  - масштаб турбулентности;  $W'$  - пульсационная скорость,  $W' = \varepsilon W$ .

Полученное значение локальной полноты сгорания  $\Delta \eta_i$  характеризует полноту сгорания по отношению к топливу на входе в рассматриваемую зону горения. Суммирование всех полнот сгорания до расчетного сечения позволяет получить изменение абсолютного значения полноты сгорания по длине жаровой трубы  $\eta_i$ .

8. Определение эмиссии токсичных веществ. Основной расчетной зависимостью при определении образования  $NO_x$  является уравнение Я.Б. Зельдовича:

$$\frac{dNO}{d\tau} = \frac{5 \cdot 10^{11}}{\sqrt{O_2}} \exp \left( -\frac{86000}{RT} \right) \left[ O_2 N_2 \frac{64}{3} \exp \left( -\frac{43000}{RT} \right) - (NO)^2 \right],$$

где  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $NO$  - мгновенные концентрации компонентов газовой смеси;  $\tau$  - время,  $T_r$  - температура в зоне реакции.

Мгновенные значения концентраций  $O_2$  и  $N_2$  определяются по известным методам расчета состава термодинамически равновесных продуктов сгорания [3].



Как следует из приведенного алгоритма расчета, с его помощью можно определить влияние тех или иных параметров на протекание основных характеристик.

Автоматизированная доводка заключается в том, что в камеру сгорания вносятся изменения с целью получения требуемых значений параметров, затем проводятся расчеты, которые позволяют определить новые характеристики камеры. На основе полученных данных корректируется облик камеры сгорания, создается экспериментальный образец и проводятся испытания.

Результаты испытаний сравниваются с требуемыми по техническому заданию. В случае несоответствия полученных характеристик условиям ТЗ проводятся повторные расчеты путем внесения дополнительных изменений в конфигурацию жаровой трубы до тех пор, пока не будет достигнуто соответствия условиям технического задания.

По достижении соответствия экспериментальных и расчетных данных условиям технического задания выполняется схемный чертеж камеры сгорания.

#### 9. Результаты расчетов характеристик камеры сгорания.

Приведенная схема автоматизированной доводки была применена при разработке камеры сгорания НК-16-18СТ. Как было сказано ранее, целью проведения расчетов с помощью приведенных моделей является снижение эмиссии  $NO_x$  и повышение надежности камеры сгорания.

Предварительный анализ рабочего процесса в камере сгорания показал, что для снижения выделения  $NO_x$  необходимо снизить температуру газа в зоне горения путем перераспределения вторичного воздуха.

Исходя из этого были внесены соответствующие изменения в распределение вторичного воздуха путем закрытия патрубков смесителей (карманов) и перераспределения этой площади подвода на два пояса отверстий:

- подвод воздуха через пояс 70-ти отверстий  $\varnothing 0,0015$  м на расстоянии 0,223 м от фронта;
- подвод воздуха через пояс 70-ти отверстий  $\varnothing 0,0015$  м на расстоянии 0,420 м от фронта.

Расчеты характеристик, проведенные для этих вариантов конфигурации жаровой трубы, показали, что можно добиться существенного изменения характеристик путем перераспределения вторичного воздуха.

На рис.3 приведены графики изменения температуры газа, полноты сгорания и выделения  $NO_x$ .

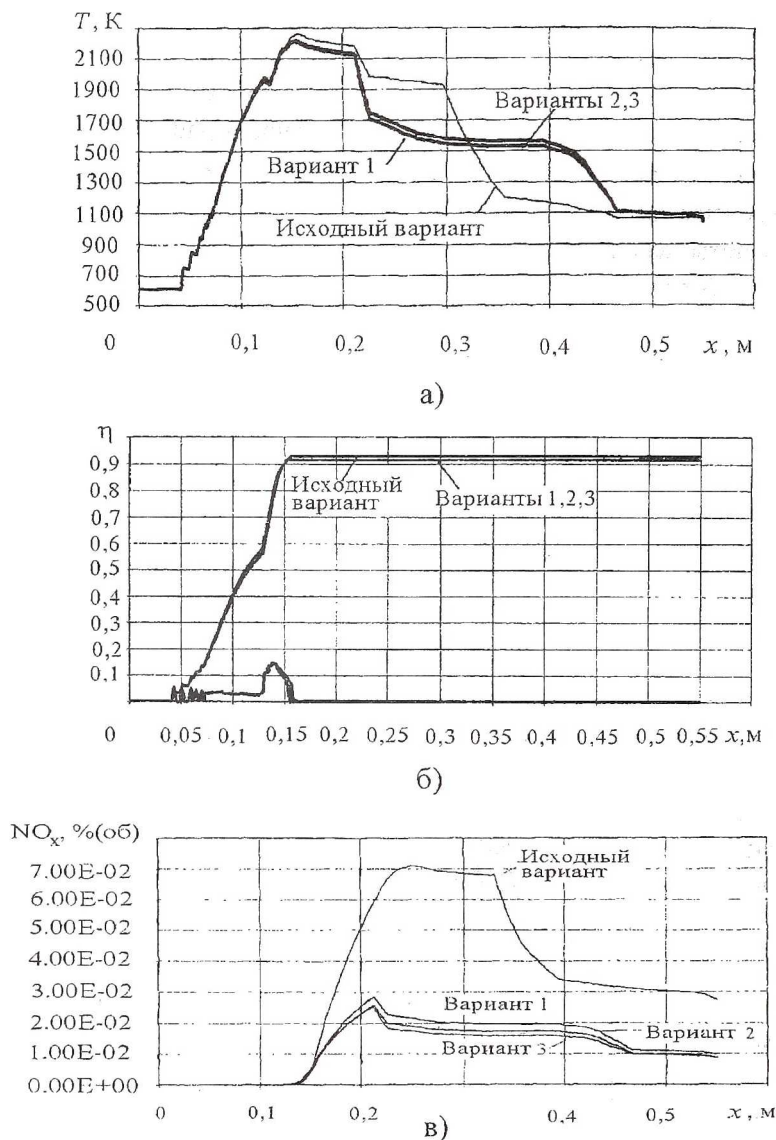


Рис. 3. Распределение по длине жаровой трубы: а) температуры; б) полноты сгорания; в) концентрации  $NO_x$ ;  $T_k=610$  K,  $P_k=1$  МПа,  $\alpha_k=5,6$



Из анализа полученных кривых следует, что перераспределение вторичного воздуха приводит к снижению температуры газа в зоне горения в результате дополнительного подвода воздуха в зону горения.

В то же время, как следует из приведенных графиков, полнота сгорания снижается незначительно по сравнению с исходным вариантом. Снижение температуры газа в зоне горения позволяет уменьшить уровень выделения  $NO_x$  с 0,02% до 0,01% объема.

Следовательно, рассмотренная схема перераспределения вторичного воздуха в жаровой трубе позволяет значительно снизить выбросы  $NO_x$  при сохранении на прежнем уровне прочих характеристик.

Другой, не менее важной характеристикой, является градиент температуры газа по длине жаровой трубы, который, в конечном итоге, определяет температурные напряжения стенок. Перераспределение воздуха снижает общий уровень температурного напряжения, поэтому можно ожидать повышения надежности работы камеры сгорания.

С другой стороны, закрытие смесительных патрубков может изменить формирование радиальных эпюр температурных полей. Для уменьшения этого влияния был организован подвод воздуха через вторые пояса отверстий на выходе из жаровой трубы, где реализуются высокие скорости втекания струй вторичного воздуха, что позволяет интенсифицировать процесс смешения и способствует выравниванию температурных полей.

Из приведенных результатов следует, что предложенная система автоматизированной доводки позволяет значительно сократить объем дорогостоящих экспериментальных исследований, возникающих при доводке характеристик камеры сгорания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моделирование процессов в камерах сгорания ГТД // Мингазов Б.Г., Явкин В.Б. Известия вузов. Авиационная техника. 1995. №1. с.47-50.
2. Исследование процессов смешения в камерах сгорания ГТД // Мингазов Б.Г., Явкин В.Б. Известия вузов. Авиационная техника. 1999. №2. с.34-36.
3. Алемасов В.Е., Дрегаллин А.Ф., Тишин В.П., Худяков В.А. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания // Под ред. Глушко В.П., т. 1- М.: изд. АН СССР, 1971.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВТОРИЧНОГО ВОЗДУХА ПО ДЛИНЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ РАСЧЁТА ПО ФИЗИКО – - МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВМ**

Мингазов Б.Г., Королёв А.Н., Меркушин В.К.,  
Стародубцев В.В., Низамутдинов Р.М.

*Казанский государственный технический университет,  
ОАО Конструкторско-производственное предприятие "Авиамотор",  
г. Казань*

Развитие газотурбинных двигателей (ГТД) на современном этапе определяют требования надёжности, экологии и экономичности их работы, которые, в свою очередь, в значительной степени зависят от совершенства конструкции и организации рабочего процесса в камере сгорания (КС) ГТД.

Рациональность конструкции КС обуславливается тем, насколько в ней правильно организовано устойчивое и высокоэффективное сжигание топлива, при минимальных потерях полного давления, равномерном температурном поле выходящих из камеры продуктов сгорания, при обеспечении высокой надёжности и долговечности работы ГТД.

Усложнение конструкции КС и повышение стоимости экспериментальных исследований вынуждают всё большее внимание уделять моделированию процессов горения и внедрению элементов автоматизированного проектирования КС. В настоящее время имеется ряд работ [1,2,3,4], посвящённых внутрикамерным процессам, но они касаются только отдельных их аспектов и не позволяют установить, в полной мере, связь между входными и выходными параметрами непосредственно с конструктивными элементами КС.

Цель данного исследования заключалась в нахождении оптимальной конструкции жаровой трубы КС, позволившей бы снизить эмиссию окислов азота и улучшить поля температур на выходе из КС, не ухудшая, при этом, надёжности камеры. Работа велась на основе рекомендаций, полученных при помощи ЭВМ на основе физико-математической модели (ФММ) и программы автоматизированной доводки камер сгорания [5].

Согласно исследованиям [5], для того чтобы понизить значение выбросов окислов азота, необходимо обеспечить такой процесс выгорания топлива, при котором распределение температуры по длине жаровой трубы будет иметь область высоких температур малой протяжённости, причём, время пребывания продуктов сгорания в ней должно быть минимальным.